

повышению маслостойкости кабеля. В то же время, наложение двухслойной оболочки на V-образном экструдере может значительно повысить устойчивость КИ к старению даже при использовании материалов с невысокой устойчивостью.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тагер А.А. Физико-химия полимеров. – М.: Научный мир, 2007. – 573с.
2. Воробьева Г.Я. Химическая стойкость полимерных материалов. – М.: Химия, 1981. – 296 с.
3. Моисеев Ю.В., Заиков Г.Е. Химическая стойкость полимеров в агрессивных средах. – М.: Химия, 1979. – 288 с.
4. Зуев Ю.С. Разрушение полимеров под действием агрессивных сред. – М.: Химия. 1972. – 232 с.
5. Будтов В.П. Физическая химия растворов полимеров. – М.: Химия, 1992. – 384 с.

## ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОРРОЗИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ КОНТАКТОВ

*С.Н. Шуликин, П.А. Бекк*

Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
Россия, Томск

Для передачи электроэнергии от источника до потребителя используют провода и кабели, изготовленные из меди или из алюминиевых сплавов. По своим электротехническим свойствам медь превосходит алюминий. Поэтому в местах потребления – в бытовых и производственных зданиях, сооружениях, требуются применять медные провода и кабели, токоведущие шины, что регламентирует ПУЭ (Правила устройства электроустановок). При соединении токоведущих частей электроустановок, подключении их к линиям электропередач создаются разъемные и неразъемные электрические контакты.

При любой, сколь угодно чистой обработке два металлических тела соприкасаются не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках по микровыступам. Таким образом, механический контакт двух тел происходит не по всей видимой поверхности, а лишь в отдельных точках [1].

При попадании электролита (водного раствора кислот щелочей), возникающего в результате теплового старения полимерных материалов, повышенной влажности окружающей среды, в пустоты электрического контакта разнородных металлов происходит процесс электрохимической коррозии.

При электрическом контакте двух металлов, обладающих разными электродными (электрохимическими) потенциалами и находящимися в электролите, образуется гальванический элемент. Поведение металлов зависит от значения их электродного потенциала. Металл, имеющий отрицательный

электродный потенциал, отдает положительно заряженные ионы в раствор, и растворяется. Избыточные электроны перетекают в металл с высоким электродным потенциалом.

На рис. 1 приведен процесс электрохимической коррозии алюминия в электрическом контакте «медь-алюминий»

В данном случае электродный потенциал алюминия [ $Al^{3+} + 3e = Al$  ( $E = -1,66$  В)] меньше, чем у меди [ $Cu^{2+} + 2e = Cu$  ( $E = +0,34$  В)], поэтому алюминий обладает большей способностью отдавать электроны. Поэтому можно утверждать, что алюминий – это анод, медь – катод, а влажная среда – это электролит [2].

Таким образом, «сырой» контакт алюминия и меди приводит к тому, что ионы алюминия, переходя во влажную среду, будут осаждаться в месте контакта в виде гидроксида алюминия  $Al(OH)_3$ , а свободные электроны будут переходить на медь, способствуя непрерывному разрушению алюминия.

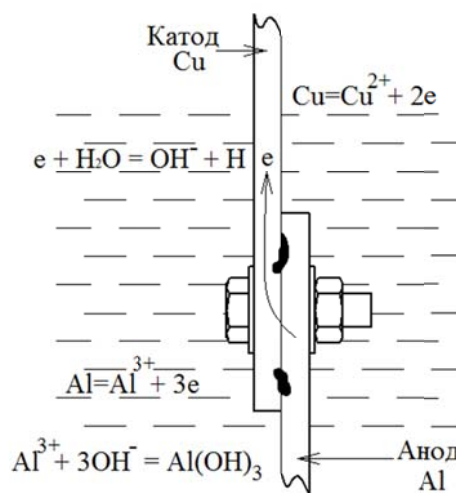


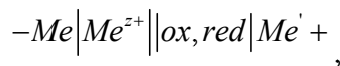
Рис. 1. Процесс электрохимической коррозии алюминия в электрическом контакте «медь-алюминий»

Это приводит к повышению сопротивления контактного соединения, потерям электроэнергии и снижению надежности электротехнических изделий. Для решения данной проблемы необходимо выяснить электрохимический механизм протекания процесса и определить критерии его оценки.

Сложность коррозионного процесса заключается в том, что на одной и той же поверхности происходят одновременно два процесса, противоположные по своему химическому смыслу: окисление металла и восстановление окислителя. Оба процесса должны протекать сопряженно, чтобы сохранялось равенство числа электронов, отдаваемых металлом и присоединяющихся к окислителю в единицу времени. Только в этом случае может наступить стационарное состояние. Электрохимический механизм протекания процесса предполагает, что окисление и восстановление подчиняются свойственным им зависимостям между потенциалом и током, где ток выражает скорость процесса. Кинетика коррозии определяется кинетикой окисления металла и восстановления окислителя.

Независимое, но сопряженное протекание процессов окисления и восстановления позволяет рассматривать коррозию при помощи анодных и катодных поляризационных кривых [3]. На рис. 2 показана коррозионная диаграмма для металла и окислителя.

Чтобы происходило окисление металла  $\varphi_{\text{Me}}^{\text{равн}}$  должен быть отрицательнее, чем  $\varphi_{\text{ox}}^{\text{равн}}$ . Для рассмотрения данного условия необходимо «отделить» пространственно металл от окислителя, построив, например, гальванический элемент вида:



где  $Me$  – активный металл, который может окисляться;  $ox$  и  $red$  – окисленная и восстановленная форма окислителя;  $Me'$  – некоторый «гипотетический» инертный металл, который не может окисляться данным окислителем, но на котором кинетика процесса  $ox \rightarrow red$  такова же, как на активном металле  $Me$ .

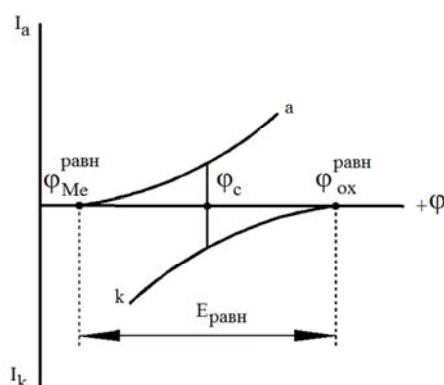


Рис. 2. Простейшая коррозионная диаграмма:  $a$  – анодная кривая;  $k$  – катодная кривая;  $\varphi_{\text{Me}}^{\text{равн}}$ ,  $\varphi_{\text{ox}}^{\text{равн}}$  – равновесные потенциалы металла и окислителя;  $\varphi_c$  – стационарный потенциал корродирующего металла

Для получения коррозионной диаграммы необходимо построить электрическую цепь, изображённую на рис. 3. Проведя несколько измерений, изменяя величину сопротивления, и соответственно наблюдая за изменением силы тока, а также потенциала в цепи, строят зависимость  $I = f(\varphi)$ . График подобной зависимости изображён на рис. 4.

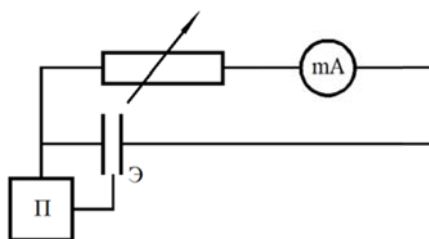


Рис. 3. Схема электрической цепи с регулируемым сопротивлением, используемой для получения данных для построения поляризационной диаграммы:  $\mathcal{E}$  – электрод сравнения,  $mA$  – миллиамперметр,  $\Pi$  – потенциометр.

При разомкнутой цепи определяется э.д.с.  $E = \varphi_{\text{ок}}^{\text{равн}} - \varphi_{\text{Ме}}^{\text{равн}}$ , являющуюся мерой максимальной работы процесса окисления металла  $-\Delta G$ . Как известно [4]  $-\Delta G = EzF$ , где  $zF$  – количество электричества, связанное с реакцией на электродах и числом молей компонентов равных стехиометрическим коэффициентам. При этом сила тока  $I_k = I_a = 0$  (или близка к нулю), так что обеспечено обратимое протекание процесса, т.е. совершение максимальной работы  $-\Delta G$ . Причиной протекания реакций окисления металла и восстановления окислителя является изменение термодинамического потенциала, или свободной энтальпии. В этом отношении  $E = \varphi_{\text{ок}}^{\text{равн}} - \varphi_{\text{Ме}}^{\text{равн}}$  имеет большое значение, определяя термодинамическую возможность коррозии.

Если не пользоваться гальваническим элементом, а просто погрузить металл в раствор, содержащий окислитель, то стационарное состояние будет возможно только в том случае, если скорость реакции окисления металла (1) будет равна скорости восстановления окислителя (2).

Это означает, что при стационарном потенциале  $\varphi_c$  скорость анодного процесса (окисления) равна скорости катодного процесса (восстановления). Равенство скоростей реакций (1) и (2) выражено на рис. 4 равенством ординат (сил тока), отвечающих  $\varphi_c$ . Наклон поляризационных кривых (рис. 2)  $a$  (анодная) и  $k$  (катодная) определяет кинетику процесса. Таким образом, данные зависимости содержат сведения о термодинамической возможности коррозии данного металла некоторым окислителем и о скорости этого процесса, определяемой кинетикой реакций (1) и (2), т.е. зависимостью их скоростей от смещения соответствующих потенциалов от равновесного значения. Коррозия возможна только в том случае, если  $-\Delta G > 0 (E > 0)$ . Если  $E > 0$  и  $\varphi_{\text{Ме}}^{\text{равн}} > \varphi_{\text{ок}}^{\text{равн}}$ , то окисление металла невозможно (рис. 4).

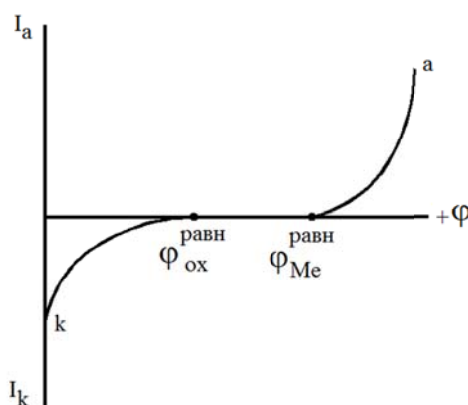


Рис. 4. Поляризационные кривые, отвечающие случаю, когда  $\varphi_{\text{Ме}}^{\text{равн}} > \varphi_{\text{ок}}^{\text{равн}}$  и коррозия металла данным окислителем невозможна

При данном  $-\Delta G$  скорость коррозии может быть различной, если поляризационные кривые  $a$  и  $k$  идут с различными наклонами. Та кривая, которая отвечает более высокому перенапряжению (идет более полого), будет определять в основном скорость процесса. Так, при большом перенапряжении реакции (2) получим случай так называемого катодного контроля (рис. 5а),

когда кинетика определяется скоростью катодной реакции; при этом  $\varphi_c$  близок к  $\varphi_{\text{Me}}^{\text{равн}}$ . При большом перенапряжении реакции (1) получим анодный контроль (рис. 5б); при этом  $\varphi_c$  близок к  $\varphi_{\text{ок}}^{\text{равн}}$ . В данных случаях окислитель, восстанавливаясь, заставляет потенциал металла сдвинуться от равновесного в сторону более положительных значений.

В зависимости от характера коррозии и условий ее протекания применяются различные методы защиты. Выбор того или иного способа определяется его эффективностью в данном конкретном случае, а также экономической целесообразностью. Любой метод защиты изменяет ход коррозионного процесса, либо уменьшая скорость, либо прекращая его полностью.

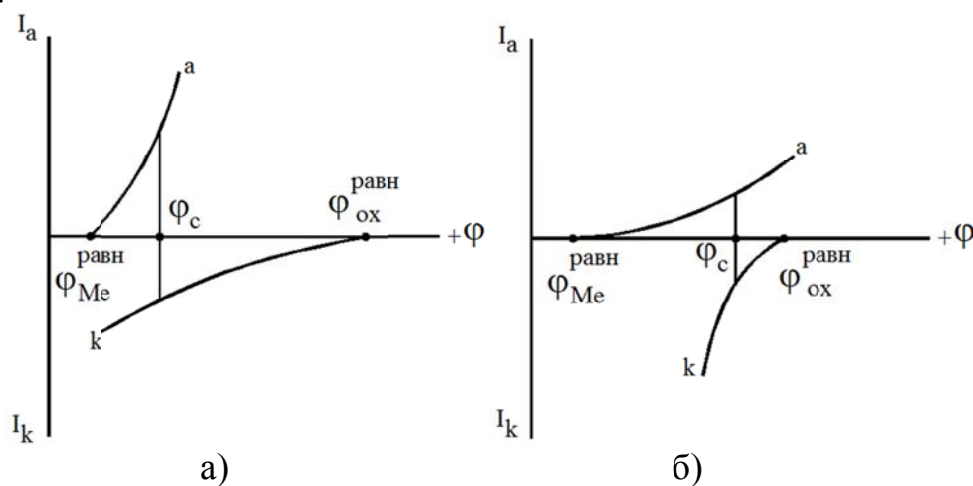


Рис. 5. Коррозионные диаграммы, отвечающие катодному контролю (а) и анодному контролю (б)

Коррозионные диаграммы, наиболее полно характеризующие коррозионный процесс, должны отражать и те изменения в ходе протекания, какие наблюдаются в условиях защиты, поэтому их можно использовать при разработке возможных путей предохранения металлов от коррозии. Они могут служить основой для выяснения принципиальных особенностей того или иного метода.

### Выводы

1. На процессы электрохимической коррозии электрических контактов из разнородных материалов оказывает влияние большое количество факторов.
2. Электрохимическое разрушение материала электрического контакта приводит к повышению переходного электросопротивления, что обуславливает снижение надежности работы электротехнических изделий.
3. Коррозионные диаграммы, как наиболее полно характеризующие коррозионный процесс, можно использовать при разработке возможных путей предохранения металлов от коррозии. Они служат основой для выяснения принципиальных особенностей того или иного метода.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мышкин Н.К. Электрические контакты. – Долгопрудный: Интеллект, 2008. – 560 с.
2. Маттссон, Эйнар. Электрохимическая коррозия. – М.: Металлургия, 1991. – 158 с.
3. Годнев И.Н. Электрохимия. Химическая кинетика и катализ. – М.: Высшая школа, 2001. – 319 с.
4. Ротинян А.Л. Теоретическая электрохимия. – Л.: Химия, 1981. – 419 с.

## ПЕРСПЕКТИВНЫЕ КАБЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРООБОГРЕВА

*Е.Ю. Солдатенко\*, А.В. Саушкин\*\**

\* – Национальный исследовательский Томский политехнический университет, Россия, Томск,

\*\* – ООО «Томский кабельный завод», Россия, Томск

Важную роль при добыче, переработке и транспортировке высоковязких и застывающих нефтепродуктов в регионах с суровым и умеренным климатом, а также на шельфовых месторождениях играет поддержание необходимой температуры трубопроводов, различного технологического оборудования и производственных площадок. Для этого требуется постоянный активный и безопасный обогрев труб и оборудования. На сегодняшний день существует несколько способов поддержания технологической температуры трубопроводов небольшой протяженности и оборудования: системы теплоспутников, электрический подогрев резистивными и саморегулирующимися кабелями.

Наиболее ранней технологией обогрева является обогрев при помощи теплоспутников. Он представляет собой подачу под высоким давлением теплоносителя (в основном, пара или перегретой воды) через одну или несколько труб, расположенных непосредственно на поверхности (внешний подогрев) или внутри (внутренний подогрев) трубопровода с нефтепродуктом (рис. 1).

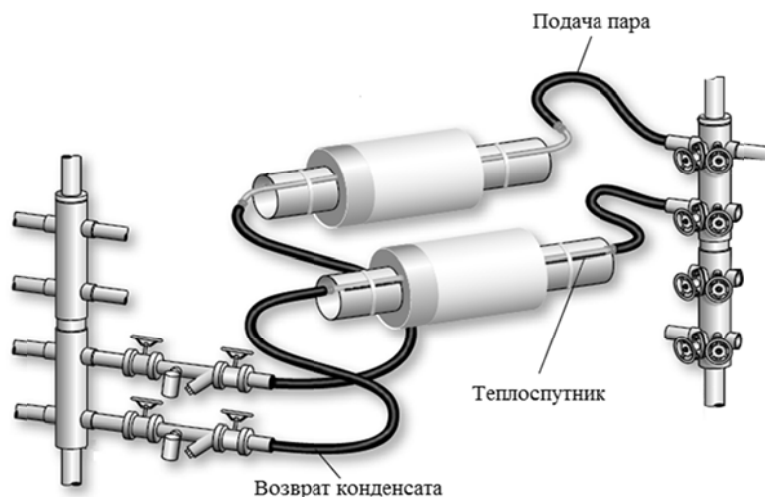


Рис. 1. Система обогрева теплоспутниками